

2. Иванов П. С., Даньков С. Ф., Юзык О. В., Шишмаев А. А. Новые ресурсосберегающие технологии в рельсовом хозяйстве // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 7. – С. 23–25.
3. Солдатенко Н. А., Карманов В. В., Ходяшев М. Б. Экологические аспекты утилизации моторных масел в качестве закалочных жидкостей // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2011. № 7. С. 60–63.
4. Святкин А. В., Азизбеян В. Г., Сардаев Н. И., Герасин А. П., Абрамова А. Н., Викарчук А. А. Изменение свойств закалочных сред в зависимости от температуры нагрева // ТГУ. 2011. № 2. С. 74–76.
5. Недома И. Расшифровка рентгенограмм порошков. М.: Metallurgy, 1975.
6. Alphabetical Indexes (Inorganic Phases) sets-44. The International Centre for Diffraction Data. 2011.

УДК 669.045

В. Г. Лисиенко, Г. К. Маликов, Ю. К. Маликов,

Д. Л. Лобанов, Е. М. Шлеймович, А. С. Перин, А. А. Титаев

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СТРУЙНО-ФАКЕЛЬНОГО ОТОПЛЕНИЯ (СФО) ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПОДОГРЕВА ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА

Аннотация

Показана ограниченная применимость традиционных горелочных устройств для прямого нагрева приточного воздуха с учетом отечественных санитарных норм. Представлены отечественные разработки метода СФО, позволившие не только повысить КПД современных нагревательных печей до 65 %, но и радикально снизить эмиссию оксидов азота (не более 30 ppm, даже при подогреве воздуха, идущего на горение, до 650 °C). Обсуждается возможность использования технологии СФО для прямого нагрева воздуха, в том числе подаваемого на проветривание шахт.

Ключевые слова: природный газ, приточный воздух, вентиляция шахт, струйно-факельное отопление, системы прямого нагрева воздуха, оксиды азота, оксид углерода.

Abstract

The limited practicality of traditional units for direct heating of influx air with consideration for home sanitary standards is showed. The home developments of DFI-method are presented, making possible not only to increase of efficiency of modern heating furnaces up to 65 % but radical to reduce of nitrogen oxides emission as well no more than 30 ppm even with air preheating up to 650 °C). The possibility of technology DFI use for direct air preheating including of shaft ventilation feed air is discussed.

Keywords: natural gas, influx air, shaft ventilation, direct flame impingement heating, systems of direct air preheating, nitrogen oxides, carbon oxides.

Приточный воздух, подаваемый в помещение для замены воздуха, уходящего по вентиляционной системе, так же как и свежий воздух, подаваемый на проветривание шахт, в холодный период года должен подогреваться до установленной нормативными документами температуры [1–3]. По способу нагрева воздуха разделяют воздухонагреватели с применением непрямого нагрева (рекуперативные воздухонагреватели) и воздухонагреватели прямого нагрева (смесительного типа). При прямом нагреве воздуха (ПНВ) нет камеры сгорания и теплообменника, горелочные устройства располагаются непосредственно в потоке приточного воздуха и пламя горелки напрямую нагревает воздух. При этом газ сжигается в потоке нагреваемого воздуха, нагрев которого осуществляется за счет смешения с продуктами сгорания.

Принципиальные преимущества прямого нагрева воздуха очевидны: 100 % использование теплоты (все химическое тепло сжигаемого топлива передается нагреваемому воздуху); за счет меньшей металлоемкости смесительные воздухонагреватели дешевле рекуперативных, характеризуются большим диапазоном мощности и отсутствием дымохода; не требуется специальная камера сгорания, дополнительная футеровка, дымосос; низкие затраты на установку и эксплуатацию (рамповый горелочный блок легко встраивается в существующие каналы приточно-вытяжной вентиляции). Особое значение, прежде всего для районов с суровыми климатическими условиями, имеет отсутствие в системе легко замерзающего теплоносителя (в отличие от традиционного использования водяных калориферов). Это обеспечивает высокую надежность теплоснабжения, так как устраняет опасность замерзания воды.

Приступая к решению задачи ПНВ, прежде всего, необходимо сформулировать требования к горелочным устройствам в части выброса вредных веществ, исходя из отечественных гигиенических нормативов на содержание вредных веществ в приточном воздухе. В качестве основных загрязнителей при сжигании природного газа выступают оксиды азота и оксид углерода. При проветривании шахт для учета суммации этих веществ остронаправленного действия используется понятие условной окиси углерода, массовая концентрация которой определяется как

$$[\text{CO}_x] = 4 [\text{NO}_x] + [\text{CO}], \quad (1)$$

где $[\text{CO}]$ – массовая концентрация оксида углерода, мг/м^3 ; $[\text{NO}_x]$ – массовая концентрация оксидов азота в пересчете на NO_2 , мг/м^3 .

Концентрация условной окиси углерода в приточном воздухе не должна превышать 30 % ПДК в воздухе рабочей зоны:

$$[\text{CO}_x] < 0,3 \times 20 = 6 \text{ мг/м}^3. \quad (2)$$

В качестве расчетного интервала температуры подогрева воздуха для проветривания шахт Уральского региона можно принять величину 44°C (от -41°C до $+3^\circ\text{C}$). Для подогрева на 44°C одного м^3 воздуха при стандартных условиях ($t = 20^\circ\text{C}$, $p = 760 \text{ мм рт. ст.}$) требуется $0,00121 \times 44 = 0,0533 \text{ МДж}$. Это количество тепла соответствует низшей теплоте сгорания природного газа, поскольку расчет показывает [4], что относительная влажность воздуха, подаваемого в помещение через установку прямого нагрева, будет всегда ниже влажности наружного воздуха. В связи с тем, что нормирование выбросов проводится, как правило, на высшую рабочую теплоту сгорания природного газа (которая на 11 % больше), значение

0,0533 следует заменить на 0,059. С учетом формулы (2), получаем требование к выбросам для горелочного устройства прямого нагрева воздуха для проветривания шахт:

$$[\text{CO}_x] < 6/0,059 = 102 \text{ мг/МДж.} \quad (3)$$

В табл. 1 приведены данные по выбросам от струйно-диффузионных горелочных устройств с уголковым перфорированным стабилизатором различных производителей. Начиная с пионерской работы Джона Старлея [4], именно этот тип горелочных устройств обычно используется для прямого нагрева воздуха.

Таблица 1

Ориентировочные значения выбросов вредных веществ при работе на природном газе струйно-диффузионных горелок с уголковым перфорированным стабилизатором

Горелка		Выброс вредных веществ, мг/МДж		
Тип	Фирма	CO	NO _x	CO _x *)
AIRFLO NP-1	MAXON, США	50	35	190
AIRFLO RG-IV	MAXON, США	45	25	145
АН-МА	Eclipse Combustion, США	80	30	200
STARWEIN	SARGI, Франция	60	40	220

*) в пересчете на условную окись углерода $[\text{CO}_x] = [\text{CO}] + 4[\text{NO}_x]$.

Внешне эти горелки выглядят практически одинаково (рис. 1) и имеют близкие геометрические размеры. Для этих конструкций было установлено, что смесительные воздухонагреватели, исходя из отечественных санитарных норм для ПДК рабочей зоны, не могут использоваться в качестве единственного источника тепла [5–6].

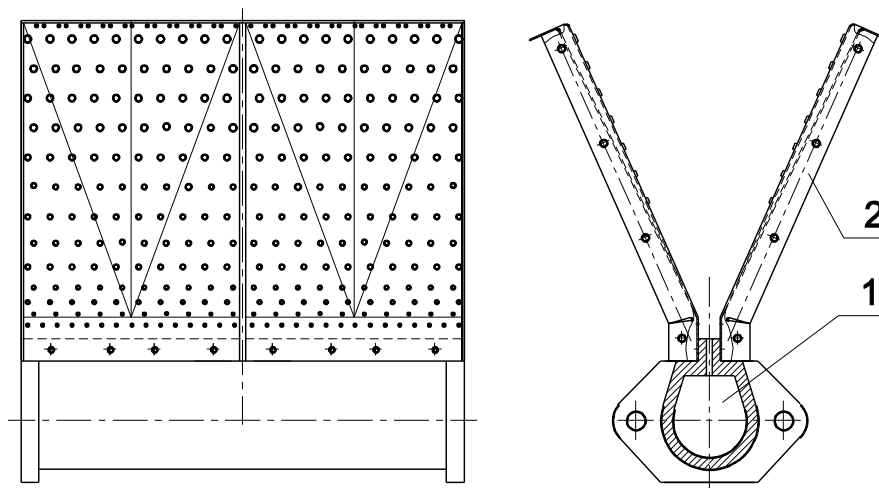


Рис. 1. Струйно-диффузионная горелка с центральным подводом газа:

- 1 – газовый коллектор с центральными соплами;
- 2 – перфорированный уголковый стабилизатор.

Первая в России система ПНВ для проветривания шахт была запроектирована ООО «Газ-Инжиниринг» и НИЦ ПЭА при УрФУ на базе воздухонагревателя РГ 1000 КМТ (аналог AIRFLO RG-IV) по двухступенчатой схеме, то есть в дополнение к существующим водяным калориферам [7]. С учетом того, что сжатый воздух является основным энергоносителем при выполнении подземных работ, в качестве основного источника тепла предусматривалось использование теплоты, утилизированной от компрессорных установок.

Дело в том, что около 30 % от себестоимости продукции горнорудных предприятий составляют затраты на электроэнергию, при этом приблизительно 25 % электроэнергии расходуется на получение сжатого воздуха для подземных работ. Подводимая к электродвигателю компрессора электроэнергия на (70÷80) % превращается в тепловую энергию, которая отводится от сжатого воздуха за счет водяного охлаждения [8]. Огромный потенциал энергосбережения у компрессорных установок постоянно привлекает внимание инженеров. Однако в суровых условиях горного Урала даже переход от типовой «мокрой» градирни к «сухой» является сложной инженерной задачей из-за опасности замерзания теплоносителя и трудностей холодного пуска оборудования при расчетной температуре $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$. Использование системы ПНВ в качестве пикового нагревателя позволило впервые в России решить задачу рационального использования тепла, выделяемого при производстве сжатого воздуха, на собственные нужды горнорудного предприятия.

Компрессорная центрального вентиляционного ствола (ЦВС) Богословского рудоправления (БРУ) оборудована пятью компрессорами К-250 с электродвигателем мощностью 1600 кВт каждый. В зависимости от потребности сжатого воздуха на горные работы используются от одного до четырех компрессоров. Схема проветривания рудника – нагнетательная. Главная нагнетательная установка ЦВС оборудована двумя вентиляторами ВОКД – 3,6 (основной и резервный, максимальная производительность по воздуху $285\text{ м}^3/\text{с}$). До технического перевооружения подаваемый на проветривание шахты воздух подогревался в водяных калориферах с теплоснабжением от котельной. Горячая вода от компрессоров охлаждалась в «мокрой» градирне (разомкнутый контур). После технического перевооружения в качестве первой ступени подогрева воздуха были установлены четыре смесительных газовых подогревателя РГ 1000 КМТ суммарной тепловой мощностью 12 МВт и производительностью по воздуху $800\text{ тыс. нм}^3/\text{ч}$. В качестве второй ступени существующие водяные калориферы были подключены к системе охлаждения компрессоров (замкнутый контур охлаждения).

Детальные исследования новой схемы подогрева шахтного воздуха были выполнены в отопительный сезон 2005–2006 гг. Наиболее важные результаты представлены на рис. 2. Компрессоры используются как энергоносители для шахтного оборудования. Тепло, которое выделяется от работы компрессоров, подается на калориферы и подогревает воздух на $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ при нулевом расходе природного газа. В этот отопительный сезон фактическая продолжительность периода отрицательных температур наружного воздуха составила 153,6 суток при средней температуре наружного воздуха $-11,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Автоматика ПНВ поддерживала температуру подаваемого в ствол воздуха на уровне $+ (5,4 \pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C})$, расход воздуха на проветривание шахты составлял $(185 \pm 10\text{ \%})\text{ нм}^3/\text{с}$. За период отрицательных температур наружного воздуха в шахту поступило 2455 млн нм^3 приточного воздуха. Фактический расход газа в отопительный сезон составил 649 тыс. нм^3 , что соответствовало удельному расходу $2,64 \times 10^{-4}\text{ м}^3$

газа / м³ воздуха. При средней температуре подогрева воздуха на 17 °С (от –11,6 до + 5,4 °С) удельный расход природного газа должен был бы составить $6,16 \times 10^{-4}$ м³ газа / м³ воздуха.

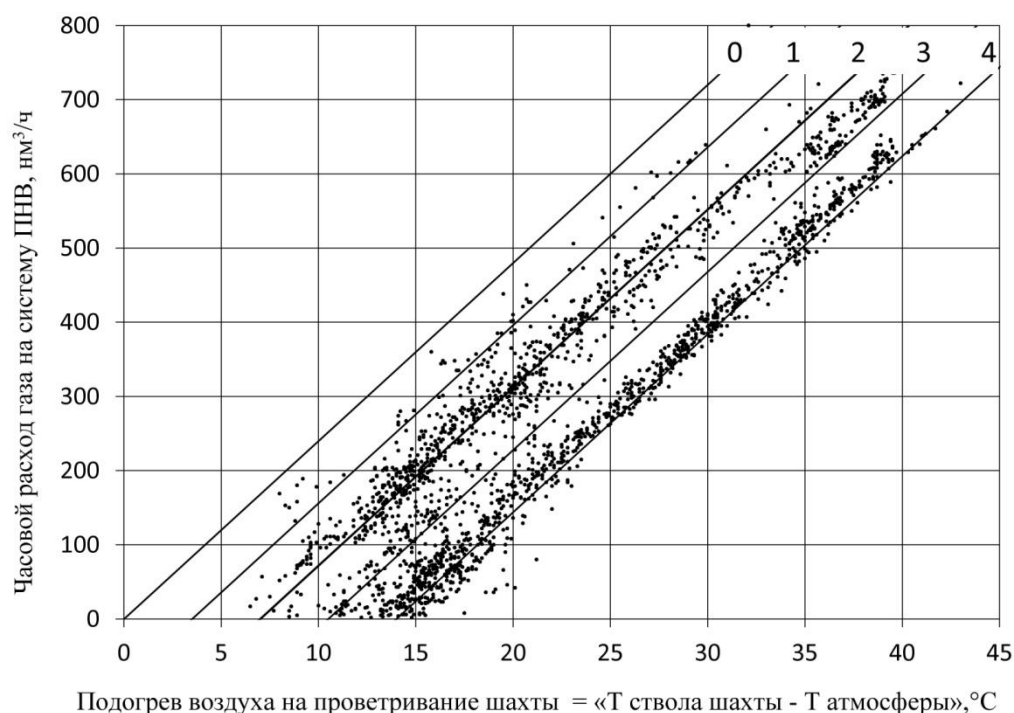


Рис. 2. Режимная карта системы ПНВ ЦВС при расходе 185 нм³/с воздуха на проветривание шахты. Цифры над прямыми – число работающих компрессоров. Точки – опытные данные за отопительный сезон 2005–2006 гг.

Таким образом, 57 % тепла на подогрев воздуха было получено за счет утилизации тепла, выделяемого компрессорами. Такое расходование газа на подогрев приточного воздуха позволило выполнить требования отечественных гигиенических нормативов качества приточного воздуха. Годовая экономия природного газа за отопительный сезон 2005–2006 гг. за счет утилизации тепла компрессоров составила 863 тыс. нм³. За 10 лет эксплуатации первой в России системы ПНВ для вентиляции шахт получена экономия 40,4 млн нм³ природного газа (по сравнению с традиционной схемой теплоснабжения от котельной).

Для расширения области применения систем ПНВ на других горнодобывающих предприятиях и возможности полного отказа от водяных калориферов требовалась существенная доработка горелочных устройств в части радикального снижения выбросов вредных веществ.

Для решения этой принципиальной и крайне сложной задачи был использован опыт применения специалистами ВНИИМТ и УрФУ струйно-факельного отопления в печах для нагрева металла. Стендовые и опытно-промышленные исследования струйно-факельного нагрева (СФН), наряду с разработкой математических моделей печей СФН, начались в 1970-х годах, а промышленное внедрение на заводах Урала осуществлялось, начиная с 80-х годов [9–10]. При этом помимо высоких теплотехнических и экономических показателей были достигнуты и очень хорошие результаты по снижению вредных выбросов, в частности, оксидов азота.

Печи СФН отличались простотой конструкции (рис. 3) и работали следующим образом. Воздух горения (холодный или нагретый до 250–650 °С) смешивался с природным газом в смесителе перед неохлаждаемыми многосопловыми горелками, а затем подготовленная газозвушная смесь раздавалась по коллекторам и соплам. Выходя из сопел со скоростью 50–400 м/с в раскаленное печное пространство, газозвушные струи прогреваются и воспламеняются, образуя систему близко расположенных гомогенных импактных факелов с максимальной температурой вблизи поверхности нагреваемых заготовок (перед ударом о металл). Большая скорость истечения смеси исключает проскок пламени в горелку, предохраняет сопла от перегрева и обеспечивает высокий коэффициент конвективной теплоотдачи у поверхности металла: 150–250 Вт/(м² К). Омыв поверхность металла и кладки, горячие продукты сгорания подсасываются в холодное ядро факела каждой струи, интенсифицируют его прогрев, зажигание и стабилизацию горения. Интенсивное перемешивание печных газов и высокие кратности циркуляции обеспечивают практически полное выгорание топлива при коэффициентах расхода воздуха от $\alpha \approx 1$ и до $\alpha = 1,5$. Численные и экспериментальные исследования аэродинамических и тепломассообменных закономерностей развития системы импактных гомогенных факелов в печах интенсивного струйно-факельного нагрева позволили выявить и обобщить основные особенности в структурах полей скоростей, температур и концентраций.

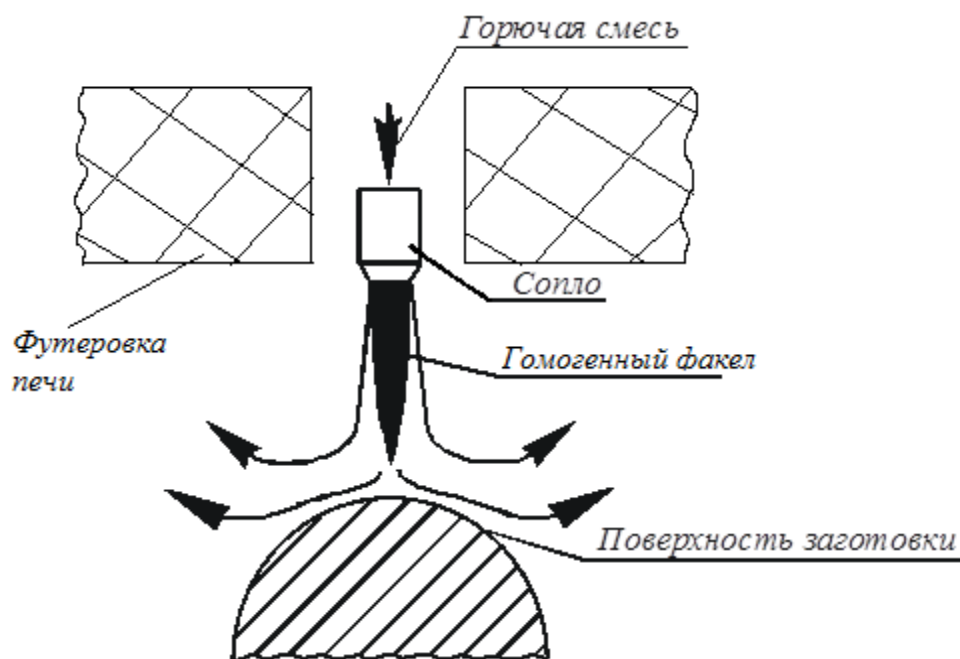


Рис. 3. Схема струйно-факельного нагрева
(показано одно из сопел многосопловой горелки)

Специальные дополнительные исследования были проведены по изучению эмиссии оксидов азота при струйно-факельном отоплении. Было установлено [11], что в печах СФН одновременно реализуется сразу несколько известных способов подавления эмиссии оксидов азота: снижение температуры горения (в результате выноса горения в рабочий объем печи и интенсивной теплоотдачи к нагреваемому металлу); увеличение кратности циркуляции (большое число струй и их высокая скорость); исключение локально перегретых зон газовой

среды в рабочем объеме печи (вследствие предварительного перемешивания и отсутствия горелочных камней). Выяснилось также, что в печах СФН оксиды азота образуются в основном не по термическому, а по быстрому механизму, их эмиссия близка к минимально возможной и практически не зависит от температуры воздуха горения (рис. 4). На опытной печи СФО, установленной в цехе Института технологий газа в Чикаго (США) и оборудованной самыми современными средствами измерения расходов, температур и составов продуктов горения, в совместных российско-американских исследованиях было установлено, в частности, что тепловой КПД достигал 65 %, а эмиссия оксидов азота, даже при подогреве воздуха до 650 °С, не превышала 37,5 мг/м³ против 300–312,5 мг/м³ на обычных печах [10].

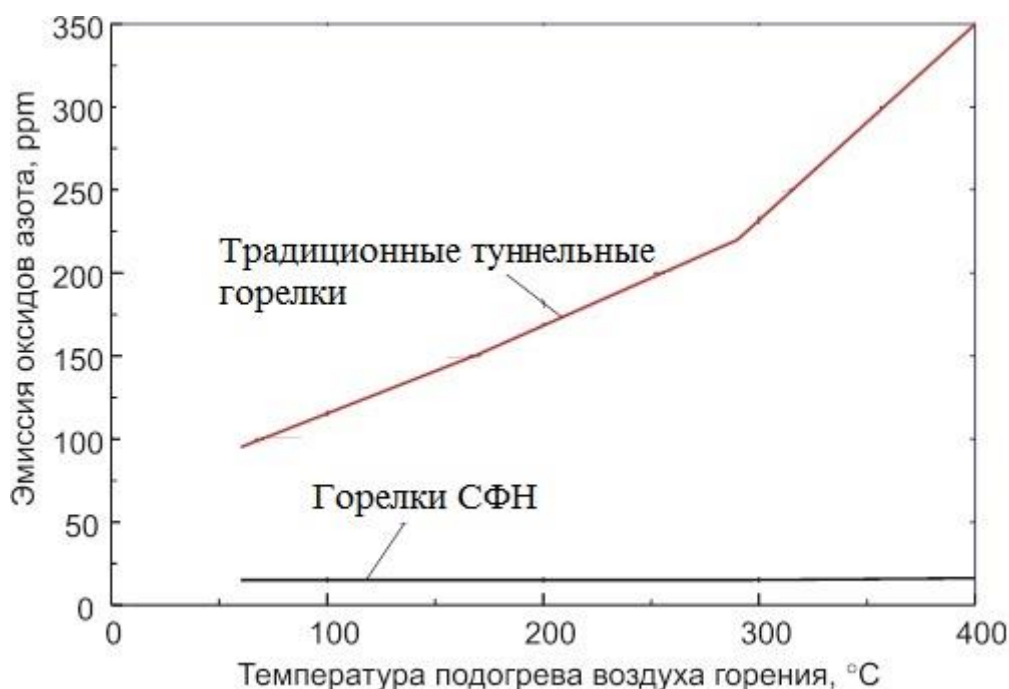


Рис. 4. Зависимость эмиссии NO_x от температуры подогрева воздуха

Основываясь на принципах СФО, дальнейшее совершенствование горелочных устройств систем ПНВ было направлено на существенное снижение количества вредных веществ, образующихся при их эксплуатации. В разработанном смесительном воздухоподогревателе РГ 2000 М, в отличие от предыдущих конструкций, организован процесс сгорания струй предварительно перемешанной газозоудшной смеси, происходящий при температуре 1150–1250 °С вблизи нижнего концентрационного предела распространения пламени ($\alpha = 1,6\text{--}1,7$). Осуществление полного сгорания при сравнительно низких температурах и больших избытках воздуха позволило получить очень низкий выход загрязняющих веществ, что было подтверждено специально проведенными исследованиями [12–13]. Системы ПНВ, основанные на рассмотренной технологии СФО сверхчистого сжигания природного газа, были установлены на шахтах «Кальинская» и «Красная шапочка» ОАО «СУБР». Структура загрязнения поступающего на проветривание шахты воздуха при температуре наружного воздуха –39 °С, с учетом ПНВ до температуры (+2 ÷ +4) °С разобрана в [12]. Показано, что основной вклад вносит фоновое загрязнение атмосферы, характерное для всего промышленного Урала. Степень фонового загрязнения (суммарная по веществам остронаправленного

действия) составляет 11,5 %, что сопоставимо с требованиями правил безопасности – не более 30 % ПДК для рабочей зоны производственных помещений. Локальное загрязнение воздуха, в пределах санитарно-защитной зоны, незначительно, поскольку в данном случае производства и ТЭЦ на промплощадке отсутствуют. Собственно вклад системы ПНВ составил 5,5 %, что в два раза меньше фонового загрязнения атмосферы.

Приведенные данные демонстрируют высокий уровень безопасности установленных систем ПНВ, что подтверждают результаты лабораторного контроля, выполненного специалистами Роспотребнадзора и ЕМНЦ. Установлено, что реализованные в РГ 2000 М концентрационно-температурные режимы окисления метана обеспечивают практически полное подавление механизмов образования таких вредных веществ как бенз(а)перен. В заметных количествах в продуктах сгорания природного газа после РГ 2000 М можно обнаружить только оксиды азота и оксид углерода. Данные исследований [13] показывают, что при соблюдении проектных режимов эксплуатации системы ПНВ во все периоды отопительного сезона (межсезонье, умеренные морозы, самый холодный месяц) концентрации вредных веществ: азота оксидов, азота диоксида, серы диоксида, углерода оксида, бенз(а)пирена, твердого аэрозоля в подаваемом в шахту воздухе не превышают существующего регламента. По сравнению с традиционной схемой (центральная котельная – теплосеть – водяной калорифер) обеспечивается экономия природного газа в 3 раза, снижение выбросов оксида углерода в 30 раз, а оксидов азота в 200 раз.

Список использованных источников

1. ПБ 03-553-03. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом.
2. СНиП 41-01 – 2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование.
3. СП 2.2.1.1312-03. Гигиенические требования к проектированию вновь строящихся и реконструируемых промышленных предприятий.
4. Thurley J. Direct fired make-up air heating // *Industrial Process Heating*. 1970. Vol. 10, No. 1. P. 30–38.
5. Колядич М. Н., Гринберг А. А., Жигалов В. П. Гигиеническая оценка систем для нагрева приточного воздуха при сжигании природного газа // *Гигиена и санитария*. – 1985. – № 4. – С. 36–38.
6. Система двухступенчатого подогрева приточного вентиляционного воздуха // *Промышленная энергетика*. 1993. № 6. С. 21–22 / В. К. Царев, В. М. Ляпаков, А. Н. Капошилов, В. Б. Карпман, А. Н. Губина.
7. Мысляков А. Л., Плотников В. В., Балдин Д. А. Применение систем прямого нагрева воздуха для вентиляции шахт // *Безопасность труда в промышленности*. 2003. № 11. С. 11–12.
8. Денисов-Винский Н. Д. Использование теплоты компрессорных установок // *Энергосбережение*. 2010. № 7. С. 54–60.
9. А.с. 726400 СССР. Проходная печь для скоростного нагрева металла / Г. К. Маликов, Ф. Р. Шкляр, Д. Л. Лобанов и др. Оpubл. 05.04.1980.
10. Lisienko V. G. and Shleimovich E. M. Improving the thermal characteristics of furnaces and the operating conditions of the lining by improving direct-flame-impingement methods for in-

tensifying the heating of metal // Refractories and Industrial Ceramics. 2013. Vol. 54, No 3. P. 188–195.

11. Расчет эмиссии оксидов азота при сжигании природного газа в промышленных горелочных устройствах // Сталь. 2002. № 2. С. 91–96 / Г. К. Маликов, В. Г. Лисиенко, К. Ю. Маликов, Е. М. Шлеймович.

12. Учет начального загрязнения поступающего атмосферного воздуха в расчете вентиляции шахт // Безопасность труда в промышленности. 2005. № 10. С. 22–24 / А. Н. Кравченко, Ю. К. Маликов, А. Л. Мысляков, В. В. Токмаков.

13. Гигиеническая оценка использования прямого подогрева воздуха, подаваемого в шахту // Гигиена и санитария. 2011. № 4. С. 41–45 / Б. Т. Величковский [и др.]

УДК 669.18

В. Г. Лисиенко, А. В. Лаптева, Ю. Н. Чесноков

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РтФ,

кафедра «Автоматика», г. Екатеринбург, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ЭНЕРГО ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ (ПАРНИКОВЫЙ) АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ

Аннотация

Приведены результаты сравнительных расчетов энергоемкости и эмиссии диоксида углерода – парникового газа – в цепочках металлургических переделов при производстве стали.

Ключевые слова: производство стали, парниковый газ; диоксид углерода; технологическое топливное число; технологическое парниковое число.

Abstract

The results of comparative calculations of energy consumption and emission of carbon dioxide - a greenhouse gas - in the chaines of metallurgical manufactories of steel production are sited.

В настоящее время в связи с резким изменением климатической обстановки на планете и борьбой мирового сообщества с парниковым эффектом целесообразно проведение и сопоставление оценки процессов и производств черной металлургии как с позиций эмиссии парниковых газов – по так называемому «углеродному следу», так и с позиций сквозной энергоемкости.

В процессах черной металлургии в основном образуются два парниковых газа: метан CH_4 и диоксид углерода CO_2 . Метан сопутствует добыче сырья для металлургических предприятий, выделяясь из горных пород. Его объемы не зависят от технологических процессов и носят случайный характер. Метан, образующийся в технологических процессах, сгорает в составе вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), образуя воду и диоксид углерода. Доля